

Для каждого из описанных типов алмазов представлены: спектры поглощения алмаза и корреляционные уравнения, соотносящие высоту полос поглощения в ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра; двумерные и пространственные модели кристаллической решетки алмаза.

В качестве объектов исследования используются образцы природных и синтетических алмазов различных типов, представляющие собой полированные пластины толщиной около 300 мкм. Каждый из образцов заключен в одинаковый неразборный держатель из анодированного алюминия.

В ходе выполнения лабораторной работы, по полученным спектрам поглощения от каждого из образцов студент должен определить типы исследуемых алмазов и рассчитать концентрации в них азота.

Полученные при выполнении лабораторной работы знания и навыки могут быть использованы для выполнения курсовых и дипломных работ, и в дальнейшем в научной и исследовательской деятельности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ДИАГНОСТИКА АЛМАЗНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ МЕТОДОМ ЭПР»

**В. Б. Оджаев, Т. М. Лапчук, Н. М. Лапчук,
А. Н. Олешкевич, К. Г. Макарикова**

Белорусский государственный университет, lapchuk@bsu.by

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием развития наноэлектронного приборостроения на основе алмаза является контроль дефектно-примесного состава при синтезе и последующей модификации структуры и свойств кристалла внешними воздействиями. Актуальность исследований собственных дефектов и примесных атомов в алмазе, а также их ассоциатов обусловлена тем, что их роль по-прежнему полностью не раскрыта [1,2]. Проблемы синтеза алмазного сырья электронного качества в настоящее время связаны с изучением магнитных, электрических и оптических свойств синтетического алмаза с примесными атомами и методов их модификации. Решение данных проблем заключается в одновременном анализе условий синтеза алмазов и их свойств, в том числе полученных при различных условиях обработки. Такой подход позволит прогнозировать и управлять основными характеристиками алмазного сырья.

Цель – изучение методом электронного парамагнитного резонанса особенностей формирования структурных дефектов в синтетическом алмазе в процессе их роста.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследования являются алмаз (природный и синтетический), углеродные и алмазные CVD пленки, нанопористые алмазные пленки, наноалмазы.

Регистрация спектров ЭПР осуществляется на спектрометре “RadioPAN SEX-2543” в X – диапазоне при включенной автоподстройке частоты генератора СВЧ (клизотрона) по частоте резонатора H_{102} . Поляризующее магнитное поле модулируется с частотой 100 кГц; чувствительность спектрометра – 3×10^{12} спин/мТл. Спектры ЭПР регистрируются как в фазе с модуляцией магнитного поля (синфазный сигнал), так и в противофазе (квадратурный сигнал).

Метод ЭПР можно рассматривать как *самостоятельный* (без привлечения дополнительных методик) в использовании его для неразрушающего экспресс-контроля качества синтезируемого алмазного сырья и возможности разбраковки алмазов по назначению в применении.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Как показывают экспериментальные исследования моно- и поликристаллических алмазов, а также алмазных пленок разных типов, наиболее распространенными дефектами во всех этих разновидностях алмазов является центр P1, представляющий собой изолированный атом азота, замещающий структурный атом углерода, и обменно-связанные пары азота, если концентрация атомов азота порядка 10^{18} см^{-3} [1,3]. В монокристаллах алмазов центры эти легко распознаваемы и используются даже для спектроскопической ориентации кристаллов (рис. 1а, б).

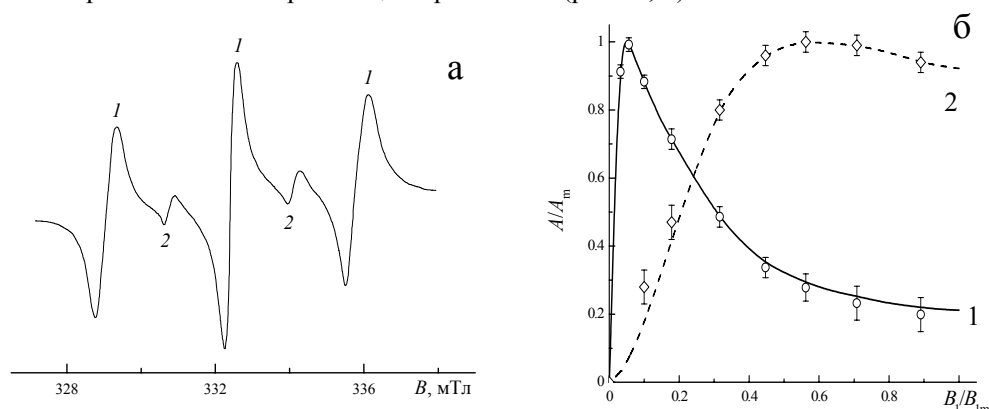


Рис. 1. Спектр ЭПР синтетического алмаза (1 - P1-центр, 2 –обменно-связанные пары азота) (а) и характер насыщения регистрируемых центров (б)

В лабораторной работе по спектру электронного парамагнитного резонанса, наблюдаемому в исследуемом алмазном сырье, студент может получить следующие параметры и характеристики объекта [4]:

- 1) по интенсивности резонансного поглощения можно определить число примесных центров в данном объекте, а, следовательно, концентрацию примеси;
- 2) функция формы линии или фактор формы, подчеркивает тот факт, что линии поглощения не могут быть бесконечно узкими; они характеризуются конечной шириной, учитываемой видом функции формы. Функция формы линии может быть получена из кинетических уравнений, описывающих процессы взаимодействия электромагнитной энергии с парамагнитной средой и демонстрировать степень равномерности распределения парамагнитных центров в кристаллах алмаза. На рисунке 2 представлен фрагмент программы, позволяющей определять форму контура линии ЭПР;
- 3) фактор спектроскопического расщепления является мерой вклада спинового и орбитального движения. Этот параметр может меняться в широком интервале от 1 до 6 и более, что обуславливается примесью орбитального момента к спиновому за счет спин-орбитального взаимодействия и может свидетельствовать о присутствии в алмазном сырье магнитоактивной примеси;

4) ширина линии резонансного поглощения свидетельствует о взаимодействиях, происходящих как внутри спин-системы, так и между спин-системой и кристаллической решеткой (является мерой совершенства парамагнитного кристалла);

5) времена парамагнитной релаксации дефектов в исследуемых алмазных образцах с применением характеристик насыщения как синфазного, так и квадратурного сигналов ЭПР (рис.1б) свидетельствуют о степени совершенства алмаза.

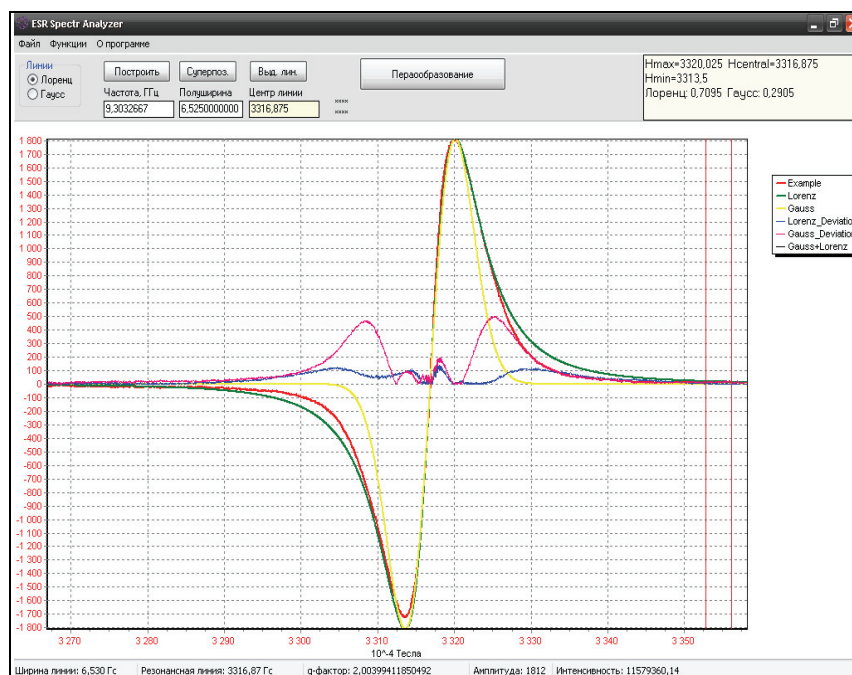


Рис. 2. Фрагмент программы «EPR analys» для оценки формы контура первой производной линии поглощения в исследуемом кристалле алмаза

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод электронного парамагнитного резонанса позволяет:

- 1) осуществлять контроль присутствия в кристаллах алмаза остаточной примеси металлов-катализаторов даже в капельно-кластерном состоянии;
- 2) определять концентрацию сопутствующей синтезу примеси атомов азота, замещающей углерод (P1-центр), при наличии ее в кристаллах более, чем $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (другие методики чувствительны к ней начиная с $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$);
- 3) разделять образцы на поликристаллические и монокристаллические;
- 4) выявлять наличие в кристаллах внутренних напряжений;
- 5) определять времена парамагнитной релаксации P1-центра, что позволит оценивать степень совершенства кристаллической решетки алмаза при любых условиях синтеза и на каждом этапе технической обработки полученного сырья и выбирать кристаллы, пригодные для изготовления квантовых парамагнитных усилителей;
- 6) установить степень однородности распределения примеси в алмазном сырье;
- 7) осуществлять промежуточный контроль шихты, идущей на изготовление ячеек для синтеза алмазов.

Все указанные выше возможности метода ЭПР основываются на грамотном и всестороннем анализе спектров, зарегистрированных при условиях, не искажающих первую производную линии поглощения. Классификация алмазов методом ЭПР может быть использована, как для их объективной аттестации с целью рационального применения, в том числе в электронной технике, так и для реконструкции особенностей условий природного алмазообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wort, C.J.H.* Diamond as an electronic material / C.J.H. Wort, R.S. Balmer. // *Materials today*. – 2008. – Vol. 11, N 1–2. – P. 22–28.
2. *Вавилов, В. С.* Алмаз в твердотельной электронике / В. С. Вавилов // *УФН*. – 1997. – Т.167, №1. – С. 17–22.
3. Физические свойства алмаза / Н. В. Новиков [и др.] ; под общ. ред. Н. В. Новикова – Киев : Наукова думка, 1987. – 190 с.
4. *Пул, Ч.* Техника ЭПР-спектроскопии / Ч. Пул – М. : Мир, 1970. – 560 с.